

**САТОНИН А.В.**, доктор техн. наук, проф., ДГМА, Краматорск  
**КОРЕНКО М.Г.**, асп., ПГТУ, Мариуполь  
**НАСТОЯЩАЯ С.С.**, асп., Краматорск

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ЛЕНТ И ПОЛОС**

В работе была разработана методика и выполнены экспериментальные исследования интегральных характеристик процессов симметричной и асимметричной прокатки относительно тонких лент и полос. Экспериментальные исследования были выполнены на лабораторном стане 100x100 ДГМА. Показана целесообразность использования кинематической асимметрии с точки зрения снижения энергосиловых параметров и повышения качества готового металлопроката. Установлено, что погрешность между расчетными и экспериментальными данными не превысила 15 %.

У роботі була розроблена методика і виконані експериментальні дослідження інтегральних характеристик процесів симетричної і асиметричної прокатки відносно тонких стрічок і штаб. Експериментальні дослідження були виконані на лабораторному стані 100x100 ДДМА. Показана доцільність використання кінематичної асиметрії з точки зору зниження енергосилових параметрів і підвищення якості готового металлопрокату. Встановлено, що погрішність між розрахунковими та експериментальними даними не перевищила 15%.

In this paper a technique was developed and carried out experimental research on the integral characteristics of symmetric and asymmetric rolling relatively thin ribbons and bands. Experimental studies were carried out using a laboratory rolling mill 100x100 DSMA. The expediency of using kinematic asymmetry in terms of reducing energy-power parameters and improve the quality of finished steel products. Established that the error between the calculated and experimental data has not exceeded 15%

Дальнейшее развитие технологий и оборудования по горячей прокатке относительно тонких лент и полос неразрывно связано с уточнением теоретических и экспериментальных результатов исследований не только интегральных, а и локальных характеристик напряженного состояния металла [1, 2]. При этом в качестве варьируемых факторов, учитывая тенденции по расширению сортамента и повышению качества готового металлопроката [3], следует рассматривать не только температурно-деформационные условия, а и показатели степени кинематической асимметрии исследуемого процесса.

Целью работы является экспериментальное исследование напряженного состояния металла при прокатке относительно тонких лент и полос, в том числе и при создании кинематической асимметрии, характеризуемой различными окружными скоростями вращения рабочих валков.

Применение кинематической асимметричной прокатки с постоянной по длине раската степенью рассогласования скоростей валков  $K_V$ , не требует знания точной зависимости силы прокатки  $P$  от  $K_V$ , т.к. любое снижение  $P$  приводит к уменьшению разнотолщинности. В нашем случае предполагается устранять продольную разнотолщинность изменением  $K_V$  в зависимости от  $P$ , поскольку на лентопрокатных и широкополосных станах изменение зазора между валками практически пропорционально изменению силы прокатки. Поэтому нужно иметь

достаточно точные зависимости силы прокатки от степени асимметрии и всех других, существенно влияющих на  $P$  параметров прокатки лент и полос.

Для получения таких зависимостей было проведено исследование методом физического моделирования на лабораторном стане дуо 100×100 ДГМА (рис. 1). Степень деформации  $\varepsilon$  изменялась в интервале 8÷40%, степень скоростной асимметрии  $K_v$  - 1,0÷1,16. Поскольку асимметрия прокатки непосредственно влияет только на коэффициент напряженного состояния  $n_\sigma$ , то материал модели значения не имеет. Поэтому использовались образцы из свинца марки С1+3% сурьма размерами 1×50×100мм.

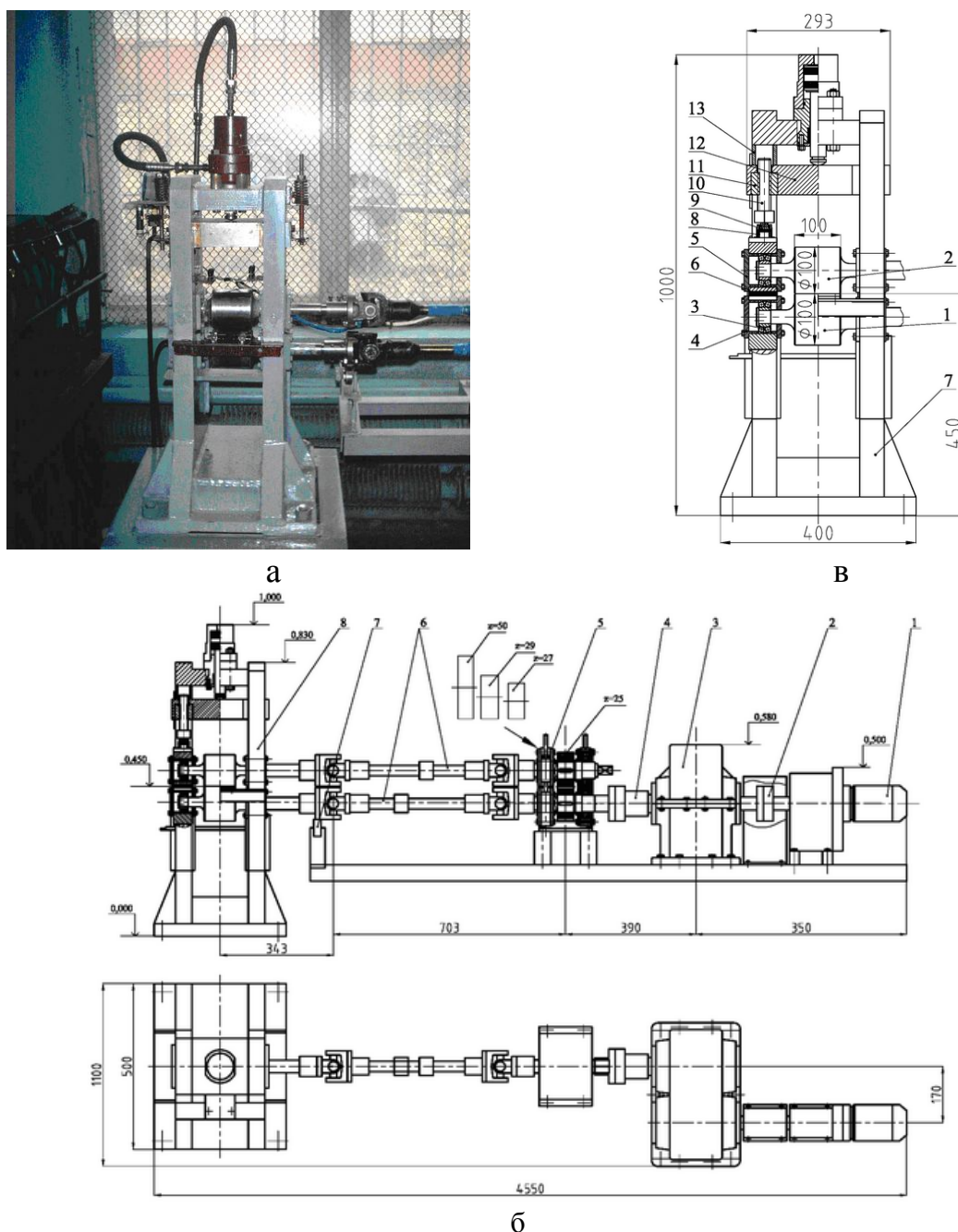


Рис.1. Общий вид (а,б) и конструкция (в) рабочей клетки лабораторного прокатного мини-стана 100х100 ДГМА

Главная линия рабочей клетки лабораторного прокатного стана 100×100 ДГМА (рис. 1) включает в себя мотор–редуктор 1 типа МЦ 2С-63

( $n = 40 \text{ об/мин}$ ), моторную муфту 2, одноступенчатый цилиндрический зубчатый редуктор 3 с передаточным отношением 4,0, промежуточную муфту 4, шестеренную клеть 5, универсальные шпиндели 6 на подшипниках качения, механизм 7 их пружинного уравнивания и собственно двухвалковую рабочую клеть 8.

Оборудование рабочей клетки данного стана, общий вид и конструкция которой иллюстрированы рисунком 1, включает в себя нижний 1 и верхний 2 рабочие валки с номинальными значениями диаметров и длин бочек по 100 мм. Посредством двухрядных сферических подшипников 3 шейки рабочих валков зафиксированы в соответствующих подушках 4, 5 между которыми с целью уравнивания верхнего рабочего валка 2 размещены резиновые прокладки 6.

Подушки 4 нижнего 1 и подушки 5 верхнего 2 рабочих валков, в свою очередь, были размещены в направляющих окнах узла станин 7 (см. рис. 1), при этом в вертикальной плоскости подушки 4 нижнего рабочего валка 1 были зафиксированы нижними поперечинами данного узла, а подушки 5 верхнего рабочего валка 2 через кольцевые упругие элементы месдоз 8 и сферические тела качения 9 были сопряжены с нажимными винтами 10 механической части нажимного механизма. Бронзовые гайки 11 данного механизма, имеющие метрические резьбовые нарезки, были зафиксированы в расточках промежуточной подвижной траверсы 12, размещенной по аналогии с подушками 4, 5 рабочих валков 1, 2 в направляющих окнах узла станин 7. В случае регулирования величины предварительного межвалкового зазора с использованием только механической части нажимного механизма промежуточную подвижную траверсу 12 фиксировали в вертикальной плоскости при помощи дополнительных проставок 13, сопрягаемых с верхними поперечинами узла станин 7.

Помимо механической части конструкция нажимного механизма рабочей клетки лабораторного мини-стана 100x100 ДГМА (рис. 1) включала в себя и гидравлическую часть, выполненную в виде гидроцилиндра 14 поршневого типа, корпус 15 которого был размещен неподвижно в расточке верхней траверсы узла станин 7, а штоковый элемент 16 сопряжен с верхней опорной поверхностью промежуточной подвижной траверсы 12. При этом помимо непосредственного регулирования величины предварительного межвалкового зазора с достаточно высоким быстродействием гидравлическая часть была использована для силовой разгрузки дополнительных проставок 13, а также для тарировки месдоз 8 путем приложения имитационных сил их сжатия известной величины. Учитывая возможность перемещения промежуточной траверсы 12 в вертикальной плоскости при подаче рабочей жидкости в поршневую или в штоковую полости гидроцилиндра 14 она была снабжена пружинным механизмом уравнивания 17, а также датчиком линейных перемещений 18 реостатного типа (рис. 1).

С учетом технических характеристик оборудования главной линии рабочей клетки лабораторного прокатного мини-стана 100x100 ДГМА (рис. 1) окружная скорость вращения рабочих валков составила порядка  $\approx 50 \text{ мм/с}$ . При этом для создания и экспериментального исследования асимметричных по кинематике условий реализации процесса прокатки листовых заготовок конструкция

шестеренной клетки 5 главной линии предполагала возможность перехода на одноступенчатый цилиндрический редуктор со сменными ведомыми зубчатыми колесами (рис. 2). Ведущая зубчатая шестерня 1 в этом случае, имеющая 25 зубьев с модулем 4 мм, посредством шпоночного соединения 2 была размещена на ведущем приводном валу 3, зафиксированном при помощи подшипников качения 4 в подушках 5 и сопряженном через соответствующую шпиндельную передачу с нижним рабочим валком. Сменные ведомые зубчатые колеса 6, имеющие количество зубьев 25, 27, 29 и 50, в свою очередь, посредством шпоночного соединения 7 были размещены на ведомом валу 8, зафиксированном подшипниками качения 9 в подушках 10 и сопряженном с верхним рабочим валком рассматриваемого прокатного мини– стана. Подушки 5 нижнего ведущего вала 3 и подушки 10 верхнего ведомого вала 8 были попарно сопряжены между собой резьбовыми стяжками 11, при этом требуемое значение межцентрового расстояния в случае перехода на новый типоразмер ведомого зубчатого колеса 6 обеспечивали за счет проставок 12 соответствующей толщины. Использование данного технического решения позволило с минимальными дополнительными затратами и с максимальными степенями унификации исследовать процессы и симметричной, и асимметричной прокатки. При этом степень кинематической асимметрии, определяемая в данном случае как соотношение окружных скоростей нижнего и верхнего рабочих валков, может быть равной 1,0; 1,08; 1,16.

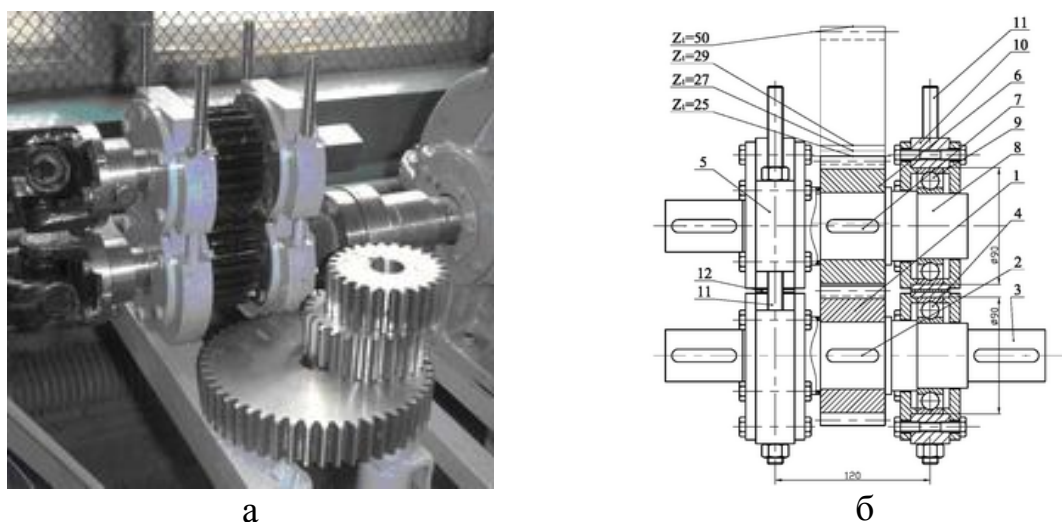


Рис. 2. Общий вид (а) и конструкция (б) шестеренной клетки-редуктора главной линии рабочей клетки лабораторного прокатного мини-стана 100x100 ДГМА

Измерение силы прокатки на лабораторном мини–стане 100×100 ДГМА производили при помощи месдоз 8, а измерение моментов прокатки на каждом из рабочих валков – при помощи тензометрических датчиков сопротивления, наклеенных в соответствии с рекомендациями авторов работы [4] на тела соответствующих универсальных шпинделей 6 главной линии рабочей клетки. Съём электрического сигнала с вращающихся универсальных шпинделей производили при помощи струнных токосъемников скольжения, а тарировку измерителей моментов осуществляли путем их имитационного нагружения с использованием консольных рычагов и набора грузов.

Измерение силы прокатки проводили двумя месдозами, расположенными между верхними подушками и нажимными винтами. Сигналы месдоз суммировались. Тарировка обоих месдоз осуществлялась на гидравлическом прессе парой, с фиксацией суммарного сигнала месдозы посредством компьютера со встроенным аналого-цифровым преобразователем АЦП-ADC16-32. Тарировка производилась многократно, перед каждой серией опытов с одинаковой  $K_v$ . Усредненный коэффициент парной корреляции между интенсивностью сигнала АЦП и силой прокатки оказался равным 0,9981. С доверительной вероятностью 0,95 при трехкратном дублировании измерений средняя относительная погрешность тарировки составила 1,67%. На рисунке 3, а показан тарировочный график одного из опытов. Доверительные пределы (пунктирные линии) указаны для вероятности 0,95.

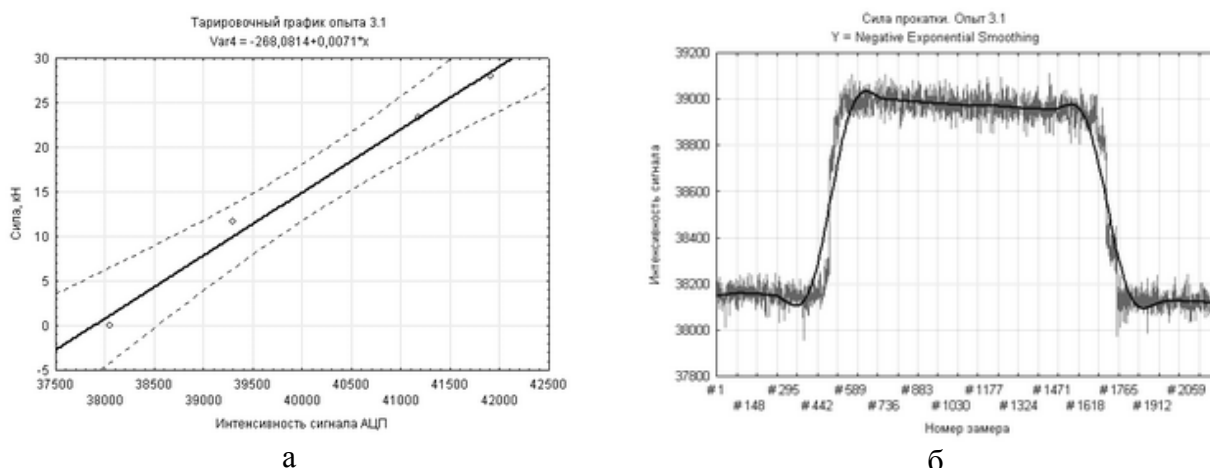


Рис.3. Тарировочный график месдоз стана 100×100Г(а); осциллограмма сигнала силы прокатки в опыте 1 (б)

Осциллограммы сигналов АЦП обрабатывались следующим образом. Выделялась средняя часть сигнала после захвата металла валками, соответствующая установившейся стадии процесса. Находились величины интенсивности сигнала в начале и в конце выделенного интервала. Затем в Excel вычислялось среднее значение интенсивности, и по тарировочным зависимостям находилась величина силы прокатки. На рисунке 3, б показана осциллограмма одного из опытов. Сглаживание было осуществлено при помощи программы «Statistica».

Каждый опыт дублировался троекратно. Точность и достоверность результатов определялись по непосредственно измеренному параметру – силе прокатки. Дисперсия эксперимента  $S^2(P) = 0,04712$ , абсолютная погрешность (при доверительной вероятности 0,95) равна 0,106 кН, средняя относительная – 1,56%. Проверка воспроизводимости эксперимента, являющейся первой предпосылкой регрессионного анализа, была проведена по критерию Кохрена со стандартной доверительной вероятностью 0,95:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = 0,31075 < G_{2,12,005}^m = 0,3924 \quad (1)$$

где  $S_{\max}^2 = 0,17598$  – максимальная дисперсия;  $\sum_{i=1}^N S_i^2 = 0,56631$  – сумма

дисперсий каждого опыта;  $G_{f,N,\alpha}^m$  – табличное значение критерия Кохрена при

числе степеней свободы  $f = m - 1$  ( $m$  – кратность дублирования), числе опытов  $N = 12$  и уровне значимости  $\alpha = 5\%$  [5].

Т.о. в эксперименте дисперсия помех была постоянной и это дает возможность проводить регрессионный анализ полученных данных.

По эмпирическим данным регрессионным анализом в среде MathCAD получены зависимости силы прокатки  $P$  от  $\varepsilon$  и  $K_v$ . График этих зависимостей показан на рисунке 4. Видно, что сила прокатки с ростом  $\varepsilon$  возрастает более всего при симметричной прокатке. При рассогласовании скоростей валков рост силы уменьшается, причем эффект кинематической асимметрии растет с увеличением степени деформации. При малых степенях деформации  $\varepsilon$  он практически отсутствует. Следовательно, для более полного использования эффекта кинематической асимметрии прокатку в последних проходах, где и производится устранение разнотолщинности, следует вести со степенями деформации 30÷40%. В этом случае сила прокатки снижается в 1,2÷1,8 раза. Видно также, что с ростом  $K_v$  степень снижения силы прокатки уменьшается.

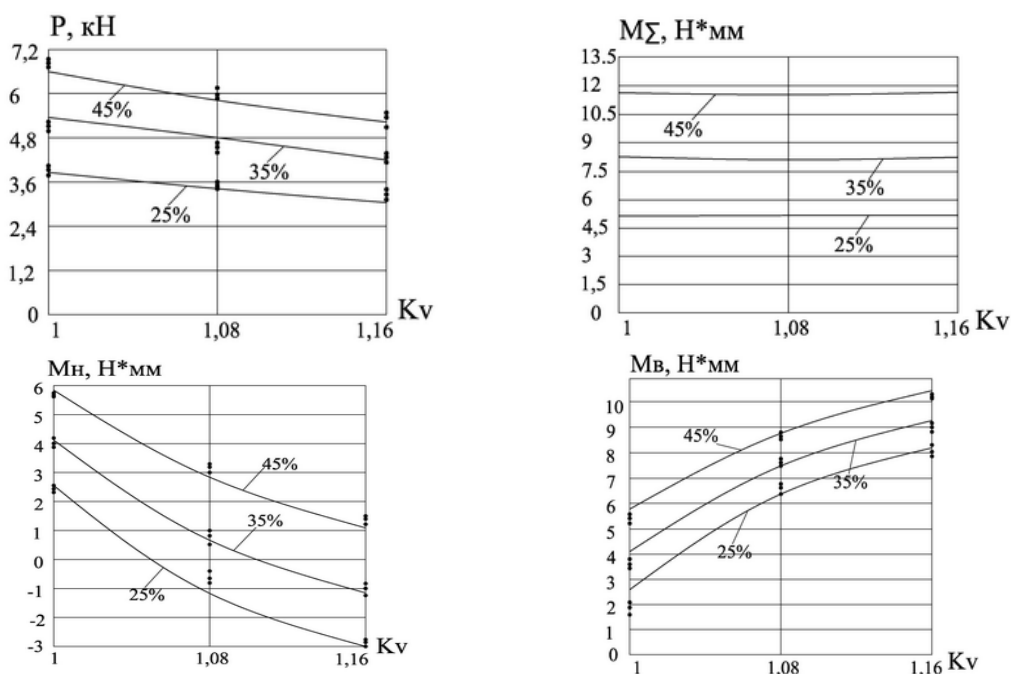


Рис. 4. Эмпирические (•) и расчётные (—) зависимости силы  $P$  и момента прокатки на нижнем  $M_n$  и верхнем  $M_b$  валках от степени кинематической асимметрии для различных обжатий

### Выводы

Проведенные экспериментальные исследования процесса горячей прокатки лент и полос подтвердили целесообразность использования асимметричной прокатки. Было установлено, что степень несоответствия экспериментальных исследований и разработанной ранее математической модели составила не более 15%.

Предложен обобщенный критерий оптимальности, установлено, что с учетом реального диапазона изменения исходных толщин, интенсивность изменения степени кинематической асимметрии должна соответствовать  $K_v = 1 \dots 1,5$ .

**Список литературы:** 1. Мазур В. Л. Теория и технология тонколистовой прокатки (Численный анализ и технические приложения) / В. Л. Мазур, А. В. Ноговицын. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-VAI», 2010. – 500 с. 2. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 243 с. 3. Николаев В. А. Несимметричная тонколистовая прокатка / В. А. Николаев, В. Н. Скороходов, В. П. Полухин. – М. : Металлургия, 1993. – 192 с. 4. Чекмарев А. П. Методы исследования процессов прокатки / А. П. Чекмарев, С. А. Ольдзиевский. – М. : Металлургия, 1969. – 274 с. 5. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике (для инженеров и учащихся вузов). - М.: Наука. - 1981. – 720 с.

**УДК 621.73**

**ЛЕСОВОЙ М.О.**, аспирант, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь.

### **БЕЗОТХОДНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОКАТА**

Разработана новая технология безотходного разделения движущихся гнутых профилей и труб. Приведен алгоритм расчета усилий надрезки сдвигом неспрофилированной плоской заготовки ножами режущих кромок специальной конфигурации.

**Ключевые слова:** нож, режущая кромка, резка, гибка, лента, профиль, труба.

Розроблена нова технологія безвідходного розділення рухомих гнутих профілів і труб. Приведений алгоритм розрахунку зусиль надрізки зсувом неспрофільованої плоскої заготовки ножами ріжучих кромок спеціальної конфігурації.

**Ключові слова:** ніж, ріжуча кромка, різання, гнуття, стрічка, про-філь, труба.

New technology of zero-emission division of the locomotive bent types and pipes is developed. The algorithm of calculation of efforts is resulted by the nadrezki change of nesprofilovannoy flat purveyance of cuttings edges of the special configuration knives.

**Keywords:** knife, cutting edge, cutting, flexible, ribbon, profil', pipe.

**Постановка проблемы.** В настоящее время идет тенденция к увеличению сортамента выпускаемых профилей и труб, тем самым необходимо увеличивать производительность в линиях профилегибочных (ТЭС) и трубоэлектросварочных станов (ПГС).

Резка металла на заданные по длине размеры ведется на всех предприятиях, связанных с его производством или переработкой. Будучи неотъемлемой частью производственного процесса, резка металла в ряде случаев становится «узким местом», ограничивающим производственные возможности. Это касается, главным образом, резки металла большого сечения или металла, находящегося в движении, в частности, резки профилей и труб по ходу их изготовления [1-3].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Резка движущегося металла известными в производстве методами с характеризуется малой производительностью, наличием стружки, большими технологическими припусками и малыми межремонтными сроками оборудования [4-9].

Возникающие проблемы во время резки непрерывно движущегося металла (проката, профиля, трубы) связано с качеством получаемых заготовок, производительностью труда и остаются актуальными на нынешний день в связи с